PCT WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation 7 : G01L 11/02

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: **WO 00/39553**

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 6. Juli 2000 (06.07.00)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/CH99/00608

(22) Internationales Anmeldedatum: 16. Dezember 1999 (16.12.99)

(30) Prioritätsdaten:
198 60 409.2 28. Dezember 1998 (28.12.98) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten ausser US)*: ABB RESEARCH LTD. [CH/CH]; CH–8050 Zürich (CH).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: BOHNERT, Klaus [CH/CH]; Loonstrasse 36, CH–5452 Oberrohrdorf (CH). BRÄNDLE, Hubert [CH/CH]; Rebbergstrasse 60, CH–8102 Oberengstringen (CH).

(74) Anwalt: ABB BUSINESS SERVICES LTD.; Intellectual Property (SLE–I), Haselstrasse 16/699, CH–5401 Baden (CH).

(81) Bestimmungsstaaten: AE, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW, ARIPO Patent (GH, GM, KE, LS, MW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

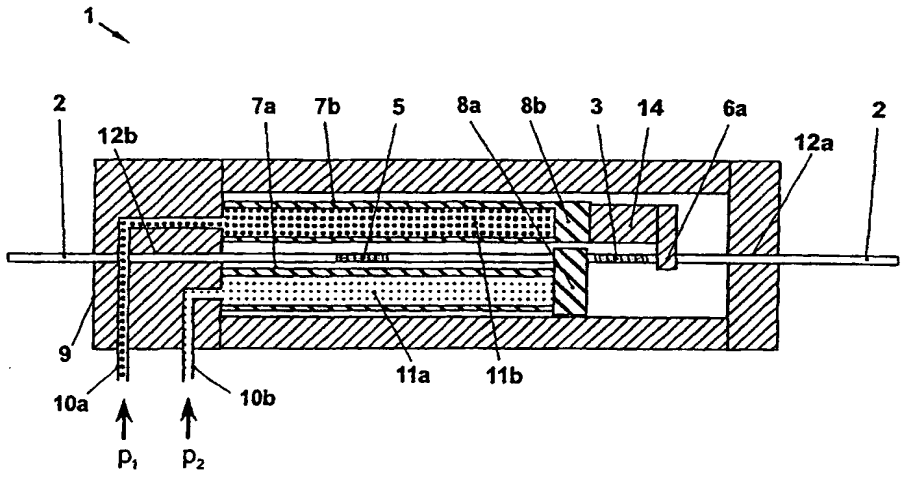
Veröffentlicht
Mit internationalem Recherchenbericht.

(54) Title: FIBRE BRAGG–GRATING SENSOR

(54) Bezeichnung: FASER–BRAGG–GITTER SENSOR ZUR MESSUNG DIFFERENTIELLER DRÜCKE UND VON STRÖMUNGSGESCHWINDIGKEITEN

(57) Abstract

The invention relates to a fibre Bragg–grating sensor (1, 25) which is suitable notably for the measurement of differential pressures and flow velocities v_1 in oil boreholes. The operating principle of the sensor provided for in the invention is based on the fact that by means of a transducer (1) having two pressure chambers (7a, 7b) a hydrostatic pressure difference between two liquid or gaseous media (11a, 11b) is converted into a longitudinal fibre expansion or compression and measured via the displacement in the Bragg wavelength $\Delta\lambda_B$ of at least one fibre Bragg grating (3, 4). Embodiments of the invention consisting of sensors comprising two fibre Bragg gratings (3, 4) having opposite expansion characteristics, temperature–compensated transducers (1) and a plurality of transducers (1) in wavelength multiplex configuration are given as examples. One application of the invention is the measurement of a flow velocity v_1 using a Venturi tube (23).



(57) Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung hat einen Faser–Bragg–Gitter Sensor (1, 25) zum Gegenstand, der insbesondere zur Messung von Differenzdrücken und Strömungsgeschwindigkeiten v_l in Erdölbohrlöchern geeignet ist. Das erfindungsgemässe Sensorprinzip beruht darauf, dass mit Hilfe eines Transducers (1) mit zwei Druckkammern (7a, 7b) eine hydrostatische Druckdifferenz zweier flüssiger oder gasförmiger Medien (11a, 11b) in eine longitudinale Faserdehnung oder Faserkompression umgesetzt und über die Verschiebung der Bragg–Wellenlänge $\Delta\lambda_B$ mindestens eines Faser–Bragg–Gitters (3, 4) gemessen wird. Es werden Ausführungsbeispiele mit zwei entgegengesetzt dehnungsempfindlichen Faser–Bragg–Gittern (3, 4), mit temperaturkompensierten Transducern (1) und mit mehreren Transducern (1) in Wellenlängenmultiplexkonfiguration angegeben. Eine Anwendung betrifft die Messung einer Strömungsgeschwindigkeit v_l mit einem Venturirohr (23).

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	**ES**	Spanien	**LS**	Lesotho	**SI**	Slowenien
AM	Armenien	**FI**	Finnland	**LT**	Litauen	**SK**	Slowakei
AT	Österreich	**FR**	Frankreich	**LU**	Luxemburg	**SN**	Senegal
AU	Australien	**GA**	Gabun	**LV**	Lettland	**SZ**	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	**GB**	Vereinigtes Königreich	**MC**	Monaco	**TD**	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	**GE**	Georgien	**MD**	Republik Moldau	**TG**	Togo
BB	Barbados	**GH**	Ghana	**MG**	Madagaskar	**TJ**	Tadschikistan
BE	Belgien	**GN**	Guinea	**MK**	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	**TM**	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	**GR**	Griechenland			**TR**	Türkei
BG	Bulgarien	**HU**	Ungarn	**ML**	Mali	**TT**	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	**IE**	Irland	**MN**	Mongolei	**UA**	Ukraine
BR	Brasilien	**IL**	Israel	**MR**	Mauretanien	**UG**	Uganda
BY	Belarus	**IS**	Island	**MW**	Malawi	**US**	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	**IT**	Italien	**MX**	Mexiko		
CF	Zentralafrikanische Republik	**JP**	Japan	**NE**	Niger	**UZ**	Usbekistan
CG	Kongo	**KE**	Kenia	**NL**	Niederlande	**VN**	Vietnam
CH	Schweiz	**KG**	Kirgisistan	**NO**	Norwegen	**YU**	Jugoslawien
CI	Côte d'Ivoire	**KP**	Demokratische Volksrepublik Korea	**NZ**	Neuseeland	**ZW**	Zimbabwe
CM	Kamerun			**PL**	Polen		
CN	China	**KR**	Republik Korea	**PT**	Portugal		
CU	Kuba	**KZ**	Kasachstan	**RO**	Rumänien		
CZ	Tschechische Republik	**LC**	St. Lucia	**RU**	Russische Föderation		
DE	Deutschland	**LI**	Liechtenstein	**SD**	Sudan		
DK	Dänemark	**LK**	Sri Lanka	**SE**	Schweden		
EE	Estland	**LR**	Liberia	**SG**	Singapur		

BESCHREIBUNG

Faser-Bragg-Gitter Sensor zur Messung differentieller Drücke und von Strömungsgeschwindigkeiten

TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der faseroptischen Druck- und Temperaturmessung. Sie geht aus von einem faseroptischen Sensor nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und 12.

STAND DER TECHNIK

Bei der Erdölförderung müssen Bohrlöcher hinsichtlich Druck und Temperatur überwacht werden. Im Bohrloch können die Flüssigkeitsdrücke bis zu ca. 100 MPa (1000 bar) und die Temperaturen bis zu über 200 °C betragen. Zur Druckmessung bis ca. 170 °C werden häufig elektrische Sensoren, wie z. B. Piezowiderstände, piezoelektrische Elemente, kapazitive Sonden oder Kristallresonatoren, oder optische Drucksensoren, wie z. B. Fabry-Perot Resonatoren oder elastooptische Sensoren, verwendet.

Ein faseroptischer Drucksensor gemäss Oberbegriff ist aus dem Artikel von M. G. Xu et al., "Optical In-Fibre Grating High Pressure Sensor", Electronics Letters 29 (4), 398-399 (1993), bekannt. Dort werden Faser-Bragg-Gitter Sensoren zur Messung isotroper Drücke von Flüssigkeiten vorgestellt. Das Bragg-Gitter einer Sensorfaser wird unmittelbar dem allseitigen hydrostatischen Druck eines Fluids ausgesetzt. Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, dass die isotrope Druckempfindlichkeit für Bragg-Gitter in Glasfasern ausserordentlich niedrig ist (typisch 0,0003 nm /100 kPa spezifische Braggwellenlängenverschiebung bei 1550 nm). Zudem ist es wegen der grossen Temperaturemp-

findlichkeit (typisch 0,01 nm/°C) erforderlich, Temperatureffekte zu kompensieren.

Ein optischer Sensor mit Faser-Bragg-Gittern zur Messung von Materialdehnungen wird z. B. in dem U. S. Pat. No. 4,761,073 offenbart. Zur Überwachung von Körperdeformationen ist die Sensorfaser typischerweise an der Oberfläche des Körpers befestigt oder im Körper eingebettet. Es wird vorgeschlagen, Signalstörungen aufgrund thermischer Gitterdehnungen mit Hilfe superponierter Gitter unterschiedlicher Reflexionswellenlängen zu eliminieren.

In dem U. S. Pat. No. 5,042,898 wird ein temperaturstabilisiertes Faser-Bragg-Gitter gezeigt, das als Wellenlängenstandard, zur Stabilisierung der Emissionswellenlänge von Laserdioden oder als Wellenlängenfilter in faseroptischen Sensoren einsetzbar ist. Die Faser ist zwischen zwei Trägern geeigneter thermischer Ausdehnung und Länge so gehaltert, dass die thermisch induzierten Änderungen der Braggwellenlänge kompensiert werden.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen Faser-Bragg-Gitter Drucksensor anzugeben, welcher zur Messung differentieller isotroper Drücke in Flüssigkeiten oder Gasen geeignet ist und sich durch eine gute Messempfindlichkeit und einen grossen Messbereich auszeichnet. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die Merkmale des Anspruchs 1 und 12 gelöst.

Durch die Erfindung wird ein faseroptischer Sensor für Differenzdruckmessungen angegeben, der einen Transducer mit Druckkörpern zur Aufnahme zweier Fluide umfasst, wobei der Transducer zur Umsetzung der Mediumsdrücke in eine longitudinale Dehnung oder Kompression mindestens eines Faser-Bragg-Gitters einer Sensorfaser ausgestaltet ist. Der Transducer steht also in Druckaustausch mit den beiden

Fluiden, wird durch deren Drücke deformiert und transformiert die Deformation in eine Längenänderung der Sensorfaser im Bereich eines Faser-Bragg-Gitters. Die Deformation des Transducers hängt von den Absolutdrücken und/oder direkt vom Differenzdruck ab.

In ersten Ausführungsbeispielen ist ein Faser-Bragg-Gitter zwischen zwei Druckkörpern gehaltert, die durch die Drücke der Fluide dehnbar sind.

In zweiten Ausführungsbeispielen ist ein Faser-Bragg-Gitter zwischen einem am Transducergehäuse befestigten Stützkörper und einem durch die Druckdifferenz beider Fluide dehnbaren Druckkörper gehaltert.

Zusätzlich kann ein Faser-Bragg-Gitter zur Fehlerkompensation so zwischen den Druckkörpern oder einem Druck- und Stützkörper angebracht sein, dass das Messignal entgegengesetzt und Störsignale gleichgerichtet sind und ein verdoppeltes störungsfreies Differenzsignal gebildet werden kann.

Ein anderes Ausführungsbeispiel stellt eine serielle, reflexive Multiplexanordnung mehrerer Faser-Bragg-Gitter Differenzdrucksensoren mit unterschiedlichen Bragg-Wellenlängen dar, die über eine gemeinsame Breitbandlichtquelle gespiesen und wellenlängenselektiv detektiert werden.

Eine bevorzugte Anwendung des Differenzdrucksensors ist die Verwendung im Zusammenhang mit einem Venturirohr zur Bestimmung einer Strömungsgeschwindigkeit.

Weitere Ausführungen, Vorteile und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie aus der nun folgenden Beschreibung anhand der Figuren.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

Es zeigen für einen erfindungsgemässen Differenzdrucksensor:

Fig. 1 einen Transducer (=Druckübertragungselement) mit zwei konzentrischen Druckzylindern: (a) Anordnung für die Dehnung eines Faser-Bragg-Gitters; (b) Anordnung mit temperaturkompensierenden Druckzylindern; (c) Anordnung für eine entgegengesetzte Dehnung zweier Faser-Bragg-Gitter zur Kompensation von Signalstörungen durch Temperatur und allseitigen Druck eines Mediums;

Fig. 2 einen Transducer mit zwei seriellen Druckzylindern (a) für die Dehnung eines Faser-Bragg-Gitters oder (b) für die entgegengesetzte Dehnung zweier Faser-Bragg-Gitter;

Fig. 3 (a), (b) einen Transducer mit zwei parallelen Druckzylindern für die Dehnung eines Faser-Bragg-Gitters;

Fig. 4 einen Transducer mit zwei Druckzylindern für eine separate Dehnung zweier Faser-Bragg-Gitter zur Messung zweier absoluter Drücke;

Fig. 5 eine Multiplexanordnung mit mehreren Differenzdrucksensoren in Reflexion und

Fig. 6 ein Venturirohr mit Differenzdrucksensor zur Bestimmung von Durchflussgeschwindigkeiten.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung hat einen faseroptischen Drucksensor zum Gegenstand. Das bekannte Messprinzip besteht darin, dass ein Faser-Bragg-Gitter, welches durch UV-Licht in eine Monomodefaser eingeschrieben ist, als Reflektions- oder Transmissionsfilter mit einer charakteristischen Bragg-Wellenlänge λ_B wirkt. Durch longitudinale Faserdehnungen werden Gitterperiode und Brechungsindex geändert und die Bragg-Wellenlänge λ_B verschoben. Die Ausgangssignale sind wellenlängenkodiert und unabhängig von der Lichtleistung. Der Messbereich ist bei Dehnungsmessungen mit Bragg-Gittern nur durch die Faserbruchgrenze eingeschränkt.

Die Erfindung wird zunächst im Hinblick auf Fig. 1-4 dargelegt. Der erfindungsgemässe faseroptische Drucksensor 1, 25 umfasst einen Transducer 1 mit einer Sensorfaser 2, die mindestens ein Faser-Bragg-Gitter 3, 4, 5 aufweist, wobei der Transducer 1 mindestens einen ersten Druckkörper 7a zur Aufnahme eines ersten Mediums 11a unter einem allseitigen Druck p_1 umfasst, mindestens einen zweiten Druckkörper 7b zur Aufnahme eines zweiten Mediums 11b unter einem allseitigen Druck p_2 umfasst und zur Messung einer Druckdifferenz p_1-p_2 durch Umsetzung der allseitigen Drücke p_1, p_2 in eine longitudinale Dehnung oder Kompression mindestens eines Faser-Bragg-Gitters 3, 4 der Sensorfaser 3 ausgestaltet ist. Mit Vorteil ist der Transducer für eine durch die Druckdifferenz p_1-p_2 induzierte differentielle Dehnung des Faser-Bragg-Gitters 3, 4 ausgestaltet. Insbesondere ist der Sensor 1, 25 zur Messung von Differenzdrücken und Strömungsgeschwindigkeiten in Erdölbohrlöchern geeignet.

In den dargestellten Ausführungsbeispielen ist die Sensorfaser 2 zwischen Halterungen 6a, 6b, 6c; 15b montiert und vorzugsweise vorgespannt, sind die Halterungen 6a, 6b, 6c; 15b mit den Druckkörpern 7a, 7b und gegebenenfalls mit Stützkörpern 15a kraftschlüssig verbunden und sind die

Druckkörper 7a, 7b zur Auslenkung mindestens einer Halterung 6a, 6b, 6c in Abhängigkeit der Drücke p_1, p_2 ausgestaltet. Bevorzugt sind genau zwei zylindrische Druckkörper 7a, 7b vorgesehen, die z. B. konzentrisch, parallel oder seriell zueinander angeordnet sind, haben die Druckzylinder 7a, 7b gleiche Länge L und sind die Halterungen 6a, 6b, 6c an Stempelflächen 8, 8a, 8b der Druckzylinder 7a, 7b befestigt.

Der Transducer 1 soll separate Einlasse 10a, 10b für die Medien 11a, 11b in die Druckkörper 7a, 7b aufweisen. Es können ein Faser-Bragg-Gitter 3 zur Differenzdruckmessung, ein Faser-Bragg-Gitter 4 zur Fehlerkompensation und/oder ein Faser-Bragg-Gitter 5 zur Temperaturmessung vorgesehen sein. Typischerweise sind die Faser-Bragg-Gitter 3 immer, 4 manchmal und 5 nicht mechanisch vorgespannt. Sie sind durch unterschiedliche Bragg-Wellenlängen λ_B charakterisiert und spektral getrennt auslesbar.

Der Transducer 1 weist druckdichte Faserdurchführungen 12a, 12b für die Sensorfaser 2 und/oder einen Hohlraum 13 für ein Faser-Bragg-Gitter 5 zur Temperaturmessung auf. Für eine nicht dargestellte Kompressionsanordnung soll mindestens ein Block mit einer Bohrung zur seitlichen Stützung der Sensorfaser 2 im Bereich eines Faser-Bragg-Gitters 3, 4 vorgesehen sein. Wegen der ca. 20fach grösseren Druck- als Dehnungsbelastbarkeit von Glasfasern ist dadurch ein sehr grosser Druckmessbereich realisierbar.

Die Fig. 1 und 3 zeigen Anordnungen, bei denen zur Differenzdruckmessung ein Faser-Bragg-Gitter 3 durch Halterungen 6a, 6b zwischen dem ersten und zweiten Druckkörper 7a, 7b fixiert ist. Insbesondere kann gemäss Fig. 1c ein Fehlerkompensations-Faser-Bragg-Gitter 4 zur gegenphasigen Dehnungsänderung in umgekehrter Reihenfolge zwischen dem zweiten und ersten Druckkörper 7b, 7a zwischen Halterungen 6a, 6c befestigt sein. D. h. die Sensorfaserabschnitte mit den Faser-Bragg-Gittern 3, 4 sind beidseits der Endplatte oder Stempelfläche 8 des ersten Druckzylinders 7a angeord-

net und an ihren gegenüberliegenden Enden mit dem zweiten Druckzylinder 7b verbunden. Dadurch sind Dehnungen durch Differenzdrücke p_1-p_2 einander entgegengesetzt und störende Dehnungen durch isotropen Druck, Temperaturabhängigkeiten der Faser-Bragg-Gitter 3, 4 und Temperaturausdehnung der Druckkörper 7a, 7b gleichgerichtet. Durch Bildung eines Differenzsignals des ersten und zweiten Faser-Bragg-Gitters 3 und 4 sind also die Störsignale eliminierbar und das Nutzsignal verdoppelbar.

Die Fig. 2 zeigen Anordnungen, bei denen ein Faser-Bragg-Gitter 3 zwischen einer durch Differenzdruck zweier Druckkörper 7a, 7b auslenkbaren Halterung 6a und einem mit dem Transducergehäuse 9 fest verbundenem Stützkörper 15a an Halterungen 6a, 15b montiert ist. Vorzugsweise sind die Druckkörper 7a, 7b seriell hintereinander angeordnet und haben eine gemeinsame Endplatte 8, mit welcher die Halterung 6a in Verbindung steht. Insbesondere ist in Fig. 2b ein vorgespanntes Fehlerkompensations-Faser-Bragg-Gitter 4 zur gegenphasigen Dehnungsänderung in umgekehrter Reihenfolge zwischen dem Stützkörper 15a und der durch Differenzdruck auslenkbaren Halterung 6a gehaltert 6a, 15b. D. h. die Faser-Bragg-Gitter 3 und 4 sind beidseits der Halterung 6a mit dem im wesentlichen fixen Stützkörper 15a über die Halterungen 15b verbunden. Dadurch ist wiederum die oben diskutierte erfindungsgemässe Kompensation von Störeffekten im Differenzsignal erreichbar.

Anhand von Fig. 1a wird eine detailliertere Analyse der Funktionsweise des Differenzdrucksensors 1 gegeben. Der erste Druckzylinder 7a ist auf einem Vorsprung oder Sockel 14 montiert, am anderen Ende mit einer Endplatte 8a verschlossen und steht unter einem Innendruck p_1 und einem Aussendruck p_2. Der konzentrische zweite Druckkörper 7b ist am Gehäuse 9 montiert, hat eine offene Endplatte 8b und ist über den Einlass 10b innen und aussen dem zweiten Druck p_2 ausgesetzt. L bezeichnet die Länge der Druckzylinder 7a, 7b und l die Länge der Dehnungsstrecke der Sensor-

faser 2 und die Länge des Sockels 14. Eine Variante mit parallelen Druckkörpern 7a, 7b ist in Fig. 3b gezeigt.

Die differentielle longitudinale Dehnung ΔL der Druckkörper 7a, 7b hängt von den druckinduzierten longitudinalen Spannungen und über die Poisson'sche Querdehnung auch von den radialen und tangentialen Spannungen in beiden Druckkörpern 7a, 7b ab. Für Druckkörper 7a, 7b gleicher Länge L, gleichen Elastizitätsmoduls E und gleicher Poissonzahl μ findet man

$$\Delta L = L \bullet \Delta p/E \bullet (1-2\mu) \bullet R_i^2 / (R_a^2-R_i^2) \quad , \qquad (G1)$$

wobei R_i=Innenradius und R_a=Aussenradius des geschlossenen, durch Differenzdruck $\Delta p=p_1-p_2$ belasteten Druckkörpers 7a. Die differentielle Dehnung ΔL ist unabhängig von den absoluten Drücken p_1, p_2 und von den Radien des Druckkörpers 7b. ΔL wird auf die Faserdehnungsstrecke 1 übertragen und bewirkt für ein Faser-Bragg-Gitter 3, 4 mit einer Bragg-Wellenlänge λ_B bei 1550 nm eine Wellenlängenverschiebung

$$\Delta\lambda_B = 1.21\ \mu m \bullet \Delta L/l \quad . \qquad (G2)$$

Auf der Faserdehnungsstrecke soll die Vorspannung so bemessen sein, dass sie auch bei maximaler Druckbelastung nicht verschwindet. Durch das Längenverhältnis L/l kann die Grösse der Faserdehnung bei gegebener Transducerdehnung vorgegeben und insbesondere für eine hohe Druckauflösung gross gewählt werden. Beispielsweise wird ein Längenverhältnis L/l>10 gewählt, um die linearen, hysteresefreien Bereiche der Transducerdehnung ($\Delta L/L<0,001$) und Faserdehnung ($\Delta l/l$ bis zu über 0,01) aufeinander abzustimmen.

Ein quantitatives Beispiel zum erzielbaren Auflösungsvermögen und Messbereich des Differenzdrucks: Druckkörper 7a, 7b aus Stahl mit $E=196\bullet10^9$ N/m^2, $\mu=0.28$, L=150 mm, l=10 mm, R_i=4,8 mm, R_a=5,0 mm. Dann ist die spezifische Verschiebung der Bragg-Wellenlängen $\Delta\lambda/\Delta p$=480 pm/MPa und das Druckauflösungsvermögen 2.1 kPa für 1 pm Wellenlängenauflösung.

Der Messbereich ist durch die Elastizitätsgrenze des Transducers 1 auf Differenzdrücke bis zu ca. 5 MPa (Bragg-Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda_B$=2,4 nm) beschränkt. Die Radien des zweiten Druckkörpers 7b sind unkritisch und können z. B. 6 mm und 8 mm betragen. Ein Transducergehäuse 9 mit 7,5 mm Innenradius und 10,5 mm Aussenradius kann absoluten Drücken über 100 MPa standhalten.

Die Bragg-Wellenlänge λ_B des Faser-Bragg-Gitters 3 kann auch unmittelbar durch den isotropen Druck p_2 ($\Delta\lambda_B$=einige pm/MPa), inhärent thermisch (10,3 pm/°C bei λ_B≈1550 nm) oder durch differentielle thermische Dehnung der Druckkörper 7a, 7b gestört werden. Gemäss Fig. 1c wird zur Kompensation ein zweites, spektral separat auslesbares Faser-Bragg-Gitter 4 auf einer gleichlangen Dehnungsstrecke 1 dem gleichen Druck p_2, der gleichen Temperatur und der gleichen thermischen Dehnung ausgesetzt und das störungsfreie Differenzsignal beider Faser-Bragg-Gitter 3, 4 ausgewertet. Darüberhinaus kann die Temperatur des Transducers 1 mit einem dritten, mechanisch unbelasteten Faser-Bragg-Gitter 5 überwacht und gegebenenfalls zur Korrektur eines Differenzdrucksignals verwendet werden.

Gemäss Fig. 1b kann alternativ oder ergänzend eine passive Temperaturkompensation für die Faserdehnungsstrecke(n) vorgesehen sein. Hierfür soll mindestens ein Druckkörper 7a, 7b und/oder mindestens ein Stützkörper 15a aus Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_1, α_2 bestehen oder zusammengesetzt sein, so dass eine differentielle thermische Ausdehnung zwischen den Halterungen 6a, 6b, 6c einer thermisch induzierten Verschiebung einer Bragg-Wellenlänge λ_B der Sensorfaser 2 entgegenwirkt. Bei vollständiger Temperaturkompensation gilt

$$(\alpha_2 \cdot L - \alpha_1 \cdot (L+l)) \;/\; l = 8{,}0 \cdot 10^{-6}\ °C^{-1} \quad , \qquad (G3)$$

wobei α_1, α_2=thermische Ausdehnungskoeffizienten des ersten Druckkörpers 7a (mitsamt Sockel 14) und des zweiten Druckkörpers 7b. Im Gegensatz zum eingangs erwähnten U. S. Pat. No. 5,042,898 werden erfindungsgemäss nach Gleichung G3

die Zylinderlängen gleich gewählt und die Ausdehnungskoeffizienten angepasst. Unter der Annahme L=150 mm, l=10 mm und $\alpha_1=12,4\cdot10^{-6}$ °C^{-1} ist $\alpha_2=14,0\cdot10^{-6}$ °C^{-1} erforderlich. Darüberhinaus ist die Faservorspannung so hoch zu wählen, dass eine hinreichende Vorspannung auch noch bei maximaler Betriebstemperatur und maximaler Druckdifferenz p_2-p_1 gewährleistet ist. Durch die Temperaturkompensation wird die Zuverlässigkeit der Differenzdruckmessung deutlich verbessert.

Geeignete Transducermaterialien sollen neben linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten gemäss Gleichung G3 auch eine geringe Nichtlinearität der thermischen Ausdehnung, eine hohe Korrosionsbeständigkeit bis zu 230 °C, einen ähnlichen Elastizitätsmodul E und eine ähnliche Poissonzahl μ aufweisen. Somit ist die Auswahl an Stählen eingeschränkt und in vielen Fällen ist die passive Temperaturkompensation nicht oder nur unvollständig durchführbar. Erfindungsgemäss können der Druck- oder Stützkörper 7a, 7b, 15a aus mindestens zwei Segmenten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und vorgebbaren Längen L', L'' zusammengesetzt sein. Im Ausführungsbeispiel nach Fig. 1b ist der zweite Zylinder 7b aus Segmenten L'' mit α_1 und L' mit α_2 aufgebaut. Die modifizierte Bedingung für die Temperaturkompensation lautet

$$(\alpha_2\cdot L' - \alpha_1\cdot(L'+l)) \;/\; l = 8,0\cdot10^{-6}\ °C^{-1} \quad . \qquad (G4)$$

Durch Wahl der Segmentlängen L', L'' (mit L'+L''=L) kann also bei gegebenen Ausdehnungskoeffizienten α_1, α_2 die differentielle Ausdehnung der Druckkörper 7a, 7b massgeschneidert werden. Beispielsweise wird eine Nickel-Basislegierung (z. B. "Hastealloy C-22" der Firma Hynes International mit $\alpha_1=12,4\cdot10^{-6}$ °C^{-1}) mit einem Chrom-Nickelstahl (z. B. "AISI 304" mit $\alpha_2=17,0\cdot10^{-6}$ °C^{-1}) kombiniert. Für L=150 mm und l=15 mm findet man L'=44,3 mm und L''=105,6 mm.

Ein Vorteil der temperaturkompensierten Anordnung nach Fig. 1b besteht darin, dass nur das erste Faser-Bragg-

Gitter 3 mechanisch vorgespannt ist. Störungen durch isotropen Druck p_2 werden mit Hilfe des nun unbelasteten Faser-Bragg-Gitters 4 erfasst und dessen Temperaturabhängigkeit wird mit dem Faser-Bragg-Gitter 5 korrigiert. Die passive Temperaturkompensation gemäss Fig. 1b reduziert den für einen Fasersensor 1 erforderlichen Bragg-Wellenlängen-Spektralbereich. Sie ist grundsätzlich bei allen Ausführungsbeispielen anwendbar.

Die Anordnungen nach Fig. 2a, 2b und 3a haben den Vorzug, dass die Faser-Bragg-Gitter 3, 4, 5 nicht dem Druck des Mediums 11b ausgesetzt sind. Der Innenraum des Transducers 1 ausserhalb der Druckkörper 7a, 7b kann mit Vakuum oder einem Niederdruckgas gefüllt sein. Die Druckkörper 7a, 7b sind für die volle Druckbelastung p_1 oder p_2 auszulegen. Der Messbereich für Differenzdrücke erstreckt sich dann bis zu p_1 oder p_2. Das Druckauflösungsvermögen beträgt für L=150 mm, auf 100 MPa ausgelegte Wandstärken und 1 pm spektraler Auflösung ca. 100 kPa. Fig. 3a zeigt eine Variante mit zwei parallelen, ausschliesslich durch Innendruck p_1 oder p_2 belasteten Druckkörpern 7a, 7b, einem vorgespannten Faser-Bragg-Gitter 3 zur Differenzdruckmessung und einem unbelasteten Faser-Bragg-Gitter 5 zur Temperaturmessung. Das Faser-Bragg-Gitter 3 wird zwischen gleichlangen Zylindern 7a, 7b über eine Endplatte 8a und einer um den Sockel 14 der Länge l verlängerten Endplatte 8b gehaltert 6a, 6b.

Fig. 4 zeigt einen weiteren Differenzdrucksensor 1, bei welchem je ein Faser-Bragg-Gitter 3 zwischen einem ersten Druckkörper 7a und einem Stützkörper 15a und einem zweiten Druckkörper 7a und einem Stützkörper 15a gehaltert 6a, 15b ist und aus den separat gemessenen Dehnungen der Faser-Bragg-Gitter 3, 4 eine Druckdifferenz $\Delta p=p_1-p_2$ bestimmbar ist. Vorteilhaft ist hierbei die kompakte Anordnung zweier Absolutdruckmessungen in einem Transducer 1.

Fig. 5 zeigt eine Multiplexanordnung 25 mit mehreren erfindungsgemässen Transducern 1 unterschiedlicher Bragg-

Wellenlänge λ_B. Die Transducer 1 sind mit einer Breitbandlichtquelle 16, z. B. einer LED oder SLD, und vorzugsweise über einen Faserkoppler 18 mit einem Wellenlängendemultiplexer 19 und einem Detektor plus Messelektronik 20 (und Computer 21) optisch verbunden. 22 bezeichnet eine optionale Quelle für Referenzwellenlängen zur spektralen Kalibration der Faser-Bragg-Gitter 3, 4, 5. Die Gitter haben ca. 0,2 nm spektrale Breite, 90% maximale Reflektivität, 10 mm Länge und Durchstimmbereiche von 2,4 nm für Temperatur (0°C-230°C) und 3,6 nm zur Differenzdruckmessung (0,003 maximale Dehnung). Mit 1 nm Reserveabstand zum Durchstimmbereich des Nachbargitters benötigt ein passiv temperaturkompensierter Transducer 1 also 7 nm spektrale Breite. Mit einer verlustarmen 1550 nm Lichtquelle (50 nm Spektralbreite) sind 7 Transducer 1 durch Wellenlänge multiplexierbar. Die Transducer 1 können alternativ oder ergänzend auch im Zeitmultiplexverfahren und/oder mittels faseroptischer Schalter sequentiell nacheinander ausgelesen werden.

Fig. 6 zeigt eine Verwendung eines erfindungsgemässen faseroptischen Differenzdrucksensors 1, 25, bei welcher aus einer Differenzdruckmessung eine Strömungsgeschwindigkeit v_1 einer Fluidströmung 24 bestimmt wird. Insbesondere sind die Einlasse 10a, 10b des Transducers 1 mit einem Venturirohr 23 an zwei Stellen mit Querschnittsflächen A_1 und A_2 verbunden. Aus dem Differenzdruck $\Delta p=p_1-p_2$ kann in bekannter Weise die Strömungsgeschwindigkeit v_1 bestimmt werden.

Insgesamt ist der faseroptische Drucksensor 1, 25 durch ein vorteilhaftes Zusammenwirken des äusserst druckbelastbaren Transducers 1 mit dem sehr dehnungsempfindlichen Faser-Bragg-Gitter 3, 4 der Sensorfaser 2 charakterisiert. Dadurch sind Differenzdrücke zwischen 0.1 kPa und 10 MPa bei sehr hohen Absolutdrücken bis zu ca. 100 MPa mit grossem Auflösungsvermögen messbar. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Drucksignal wellenlängenkodiert

und somit sehr störungsunempfindlich ist. Es kann über grosse Distanzen zwischen dem passiven Sensorkopf 1 und der optoelektronischen Messeinrichtung 16, 19-22 unmittelbar faseroptisch ausgelesen werden. Vorteilhaft sind auch die gute Hochtemperaturtauglichkeit, Korrosionsbeständigkeit und elektromagnetische Störunempfindlichkeit. Der Sensor 1, 25 ist aufgrund seiner Kompaktheit besonders zur Messung von Differenzdrücken und Strömungsgeschwindigkeiten in Bohrlöchern geeignet.

BEZUGSZEICHENLISTE

1	Faseroptischer differentieller Drucksensor (Transducer)
2	optische Faser, Sensorfaser
3	Faser-Bragg-Gitter 1 (für Druckmessung)
4	Faser-Bragg-Gitter 2 (für Kompensationsmessung)
5	Faser-Bragg-Gitter 3 (für Temperaturmessung)
6a-6c,15b	Halterungen, Faserhalterungen, Ferrulhalterungen
7a-7b	Druckkörper, Druckzylinder
7a	Druckzylinder 1 (Innendruck p_1)
7b	Druckzylinder 2 (Referenzdruck p_2), Referenzzylinder
8,8a,8b	Endplatten der Druckkörper, Stempelfläche
9	Transducergehäuse
10a, 10b	Einlasse
11a	Medium 1, Fluid 1 (unter Druck p_1)
11b	Medium 2, Fluid 2 (unter Druck p_2)
12a, 12b	druckdichte Faserdurchführungen
13	Hohlraum für Temperatursensorfaser
14	Vorsprung, Sockel
15a	Stützkörper, Stützzylinder
16	(Breitband-)Lichtquelle, LED, SLD
17	Zuleitungsfasern
18	Koppler, Faserkoppler
19	Wellenlängendemultiplexer, (abstimmbares) Spektralfilter, Fabry-Perot Filter

20	Detektor und Messelektronik
21	Computer, PC
22	Quelle für Referenzwellenlängen
23	Venturirohr
24	Fluidströmung
25	Gesamtsensor

A_1, A_2	Querschnittsflächen
α_1, α_2	thermische Ausdehnungskoeffizienten
E	Young'scher Elastizitätsmodul
l	Länge der Dehnungsstrecke der Drucksensorfaser
L	Länge eines Druckzylinders
ΔL	differentielle Dehnung
L', L''	Segmentlängen eines Druckzylinders/Stützzylinders
λ_B	Bragg-Wellenlänge
$\Delta\lambda_B$	Bragg-Wellenlängenverschiebung
μ	Poissonzahl
p_1, p_2	Drücke
Δp	Druckdifferenz
R_i	Innenradius des ersten Druckzylinders
R_a	Aussenradius des ersten Druckzylinders
v_1, v_2	Strömungsgeschwindigkeiten

PATENTANSPRÜCHE

1. Faseroptischer Drucksensor (1, 25), insbesondere geeignet zur Messung von Differenzdrücken und Strömungsgeschwindigkeiten in Erdölbohrlöchern, umfassend einen Transducer (1) mit einer Sensorfaser (2), die mindestens ein Faser-Bragg-Gitter (3, 4, 5) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
 a) der Transducer (1) mindestens einen ersten Druckkörper (7a) zur Aufnahme eines ersten Mediums (11a) unter einem allseitigen Druck p_1 umfasst,
 b) der Transducer (1) mindestens einen zweiten Druckkörper (7b) zur Aufnahme eines zweiten Mediums (11b) unter einem allseitigen Druck p_2 umfasst und
 c) der Transducer (1) zur Messung einer Druckdifferenz p_1-p_2 durch Umsetzung der allseitigen Drücke p_1, p_2 in eine longitudinale Dehnung oder Kompression des mindestens einen Faser-Bragg-Gitters (3, 4) der Sensorfaser (2) ausgestaltet ist.

2. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Transducer (1) für eine durch die Druckdifferenz p_1-p_2 induzierte differentielle Dehnung des Faser-Bragg-Gitters (3, 4) ausgestaltet ist.

3. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-2, dadurch gekennzeichnet, dass
 a) die Sensorfaser (2) zwischen Halterungen (6a, 6b, 6c; 15b) montiert und vorzugsweise vorgespannt ist,
 b) die Halterungen (6a, 6b, 6c; 15b) mit den Druckkörpern (7a, 7b) und gegebenenfalls mit Stützkörpern (15a) kraftschlüssig verbunden sind und
 c) die Druckkörper (7a, 7b) zur Auslenkung mindestens einer Halterung (6a, 6b, 6c) in Abhängigkeit der Drücke p_1, p_2 ausgestaltet sind.

4. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass

 a) genau zwei zylindrische Druckkörper (7a, 7b) vorgesehen sind, die konzentrisch, parallel oder seriell zueinander angeordnet sind,

 b) die Druckzylinder (7a, 7b) gleiche Länge L haben und

 c) die Halterungen (6a, 6b, 6c) an Stempelflächen (8, 8a, 8b) der Druckzylinder (7a, 7b) befestigt sind.

5. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, dass

 a) der Transducer (1) separate Einlasse (10a, 10b) für die Medien (11a, 11b) in die Druckkörper (7a, 7b) aufweist und/oder

 b) ein Faser-Bragg-Gitter (3) zur Differenzdruckmessung, ein Faser-Bragg-Gitter (4) zur Fehlerkompensation und/oder ein Faser-Bragg-Gitter (5) zur Temperaturmessung vorgesehen sind/ist.

6. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass

 a) zur Differenzdruckmessung ein Faser-Bragg-Gitter (3) zwischen dem ersten und zweiten Druckkörper (7a, 7b) gehaltert (6a, 6b) ist und

 b) insbesondere ein Fehlerkompensations-Faser-Bragg-Gitter (4) zur gegenphasigen Dehnungsänderung in umgekehrter Reihenfolge zwischen dem zweiten und ersten Druckkörper (7b, 7a) gehaltert (6a, 6c) ist.

7. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, dass

 a) ein Faser-Bragg-Gitter (3) zwischen einer durch Differenzdruck zweier Druckkörper (7a, 7b) auslenkbaren Halterung (6a) und einem Stützkörper (15a) gehaltert (6a, 15b) ist, wobei vorzugsweise die Halterung (6a) mit einer gemeinsamen Endplatte (8) zweier seriell angeordneter Druckkörper (7a, 7b) verbunden ist und

b) insbesondere ein Fehlerkompensations-Faser-Bragg-Gitter (4) zur gegenphasigen Dehnungsänderung in umgekehrter Reihenfolge zwischen dem Stützkörper (15a) und der durch Differenzdruck auslenkbaren Halterung (6a) gehaltert (6a, 15b) ist.

8. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-7, dadurch gekennzeichnet, dass

a) je ein Faser-Bragg-Gitter (3) zwischen einem ersten Druckkörper (7a) und einem Stützkörper (15a) und einem zweiten Druckkörper (7a) und einem Stützkörper (15a) gehaltert (6a, 15b) ist und

b) mit beiden Faser-Bragg-Gittern (3, 4) eine Druckdifferenz bestimmbar ist.

9. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-8, dadurch gekennzeichnet, dass

a) mindestens ein Druckkörper (7a, 7b) und/oder mindestens ein Stützkörper (15a) aus Materialien mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_1, α_2 besteht oder zusammengesetzt ist, so dass eine differentielle thermische Ausdehnung zwischen den Halterungen (6a, 6b, 6c) einer thermisch induzierten Verschiebung einer Bragg-Wellenlänge (λ_B) der Sensorfaser (2) entgegenwirkt und

b) insbesondere ein Druck- oder Stützkörper (7a, 7b, 15a) aus mindestens zwei Segmenten mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und vorgebbaren Längen L', L'' zusammengesetzt ist.

10. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-9, dadurch gekennzeichnet, dass

a) der Transducer (1) druckdichte Faserdurchführungen (12a, 12b) für die Sensorfaser (2) aufweist und/oder

b) der Transducer (1) einen Hohlraum (13) für ein Faser-Bragg-Gitter (5) zur Temperaturmessung aufweist und/oder

c) für eine Kompressionsanordnung mindestens ein Block mit einer Bohrung zur seitlichen Stützung der Sensorfaser (2) im Bereich eines Faser-Bragg-Gitters (3, 4) vorgesehen ist.

11. Faseroptischer Sensor (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-10, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Transducer (1) unterschiedlicher Bragg-Wellenlänge λ_B mit einer Breitbandlichtquelle (16) und vorzugsweise über einen Faserkoppler (18) mit einem Wellenlängendemultiplexer (19) und einem Detektor plus Messelektronik (20) in optischer Verbindung stehen.

12. Verwendung eines faseroptischen Differenzdrucksensors (1, 25) nach einem der Ansprüche 1-11, dadurch gekennzeichnet, dass

a) aus einer Differenzdruckmessung eine Strömungsgeschwindigkeit v_1 einer Fluidströmung (24) bestimmt wird und

b) insbesondere die Differenzdruckmessung an einem Venturirohr (23) durchgeführt wird.

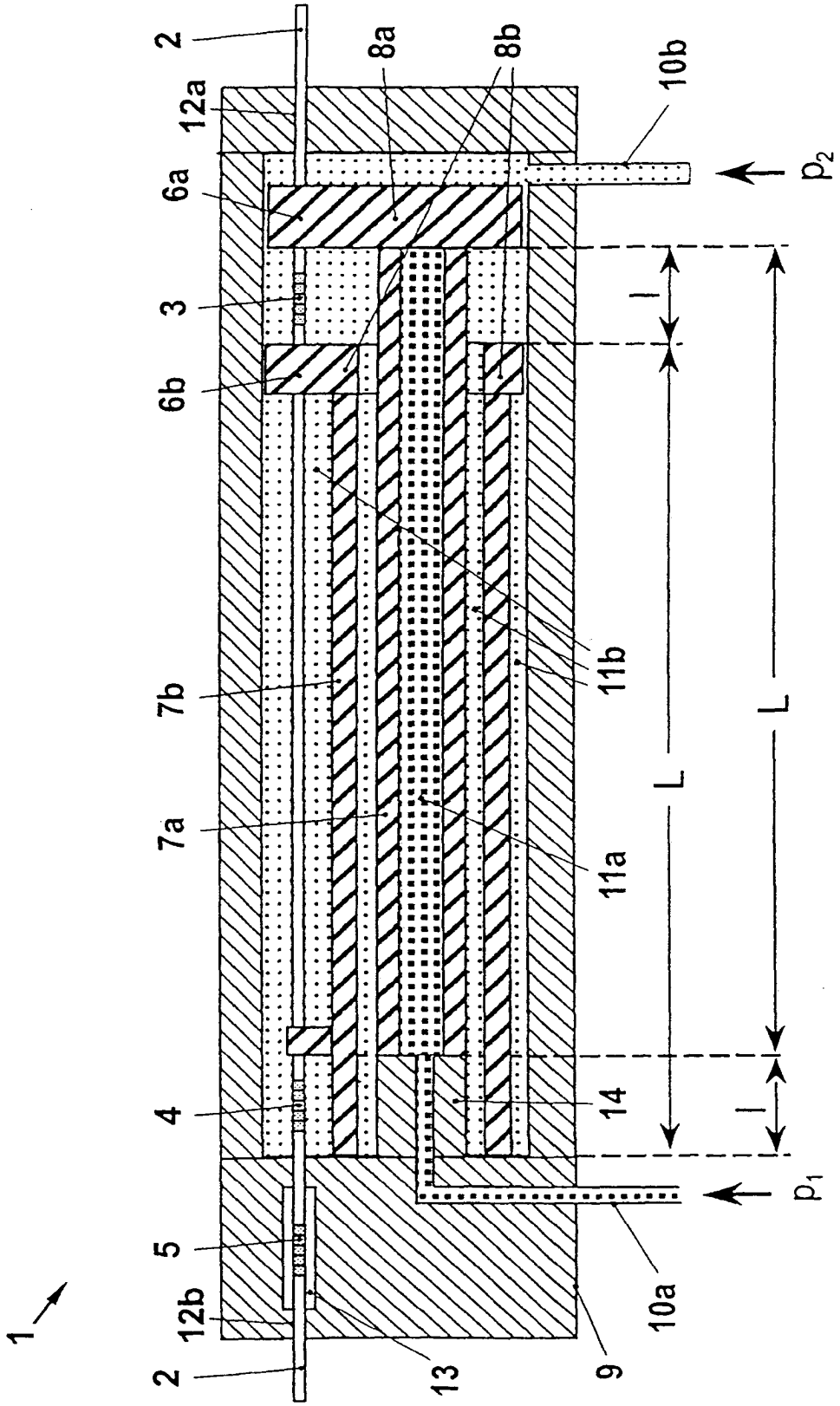


FIG. 1a

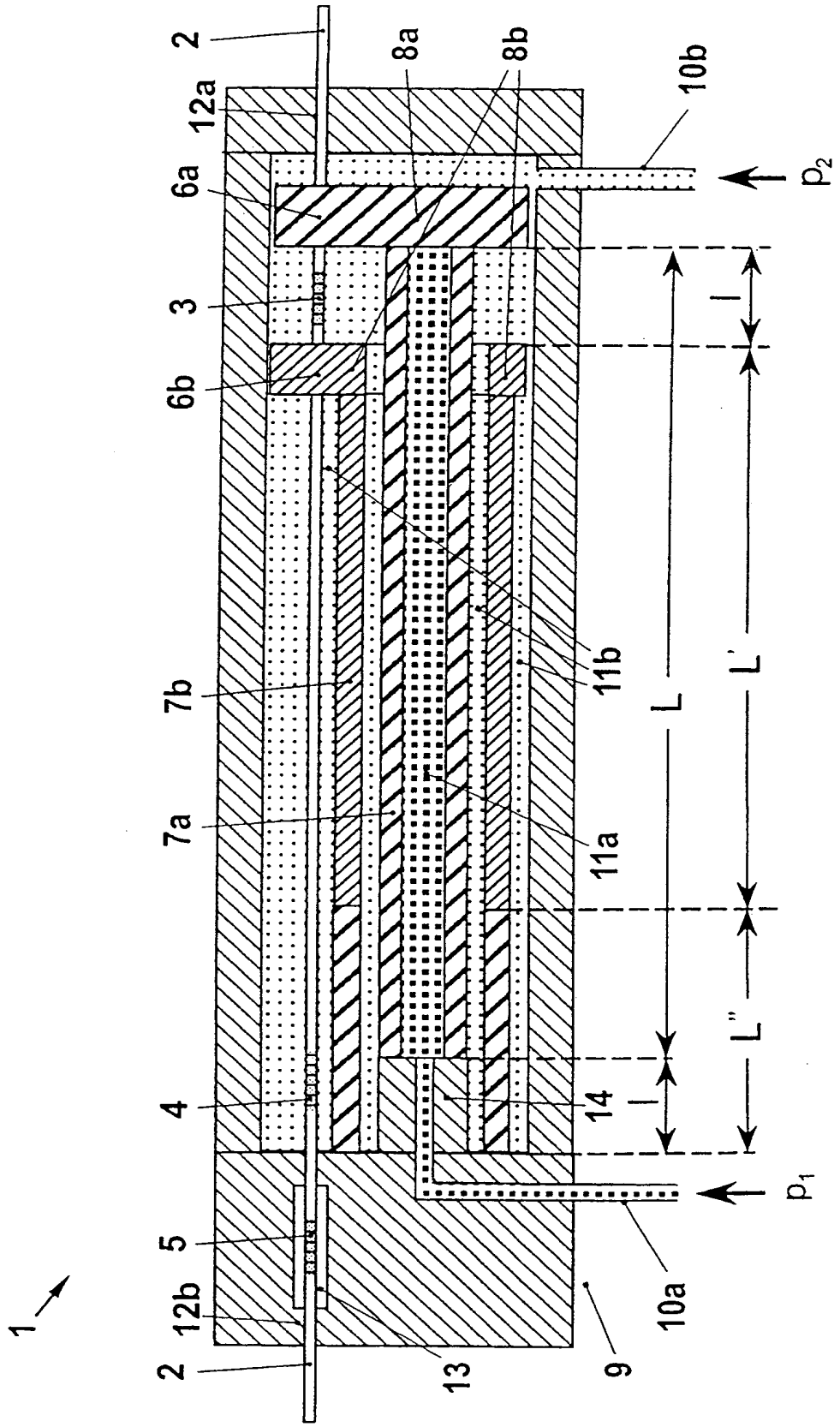

1
2
12a
6a
3
6b
7b
7a
4
5
12b
2
8a
8b
10b
p_2
11b
11a
14
13
9
10a
p_1
L
L'
L''
l
l

FIG. 1b

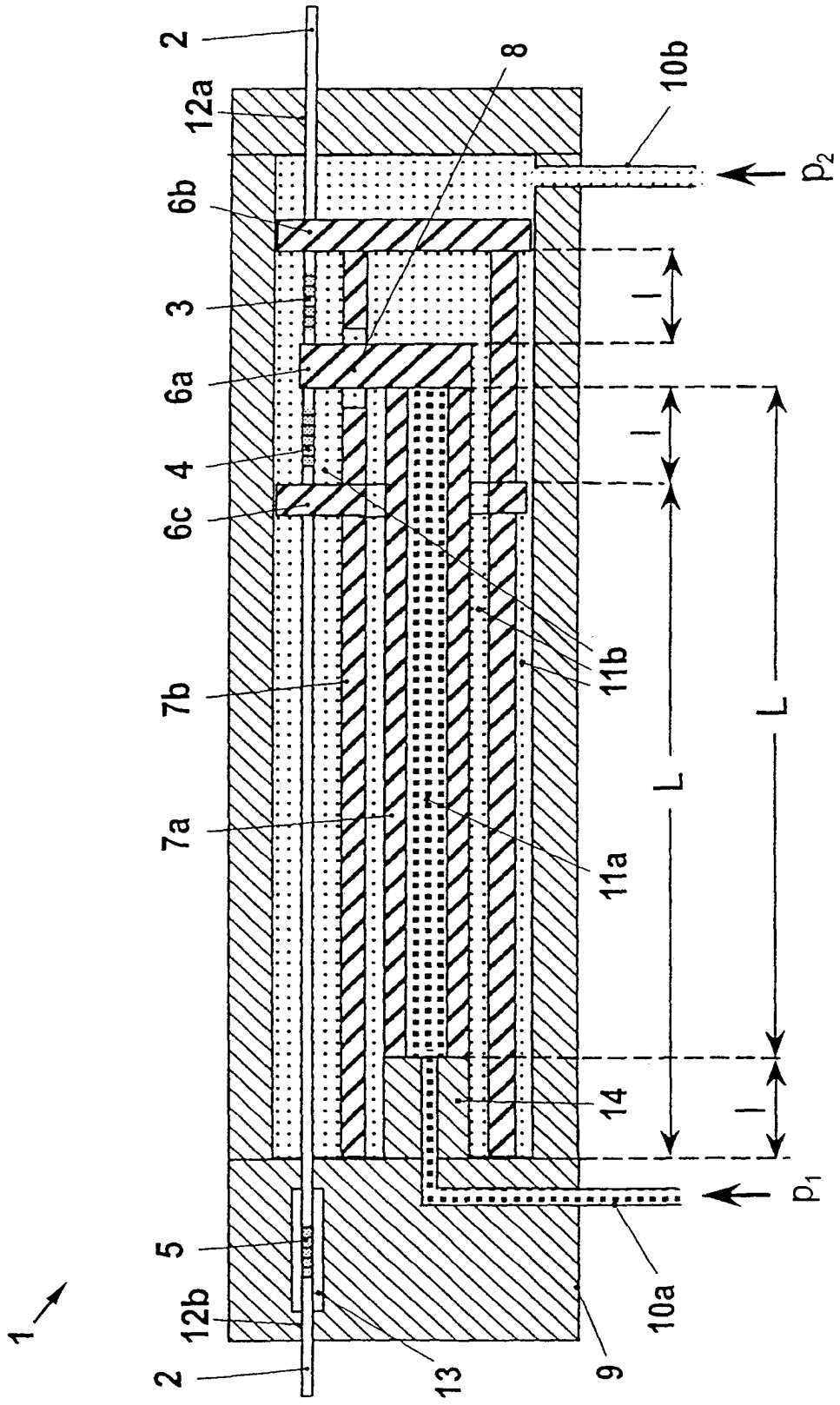


FIG. 1c

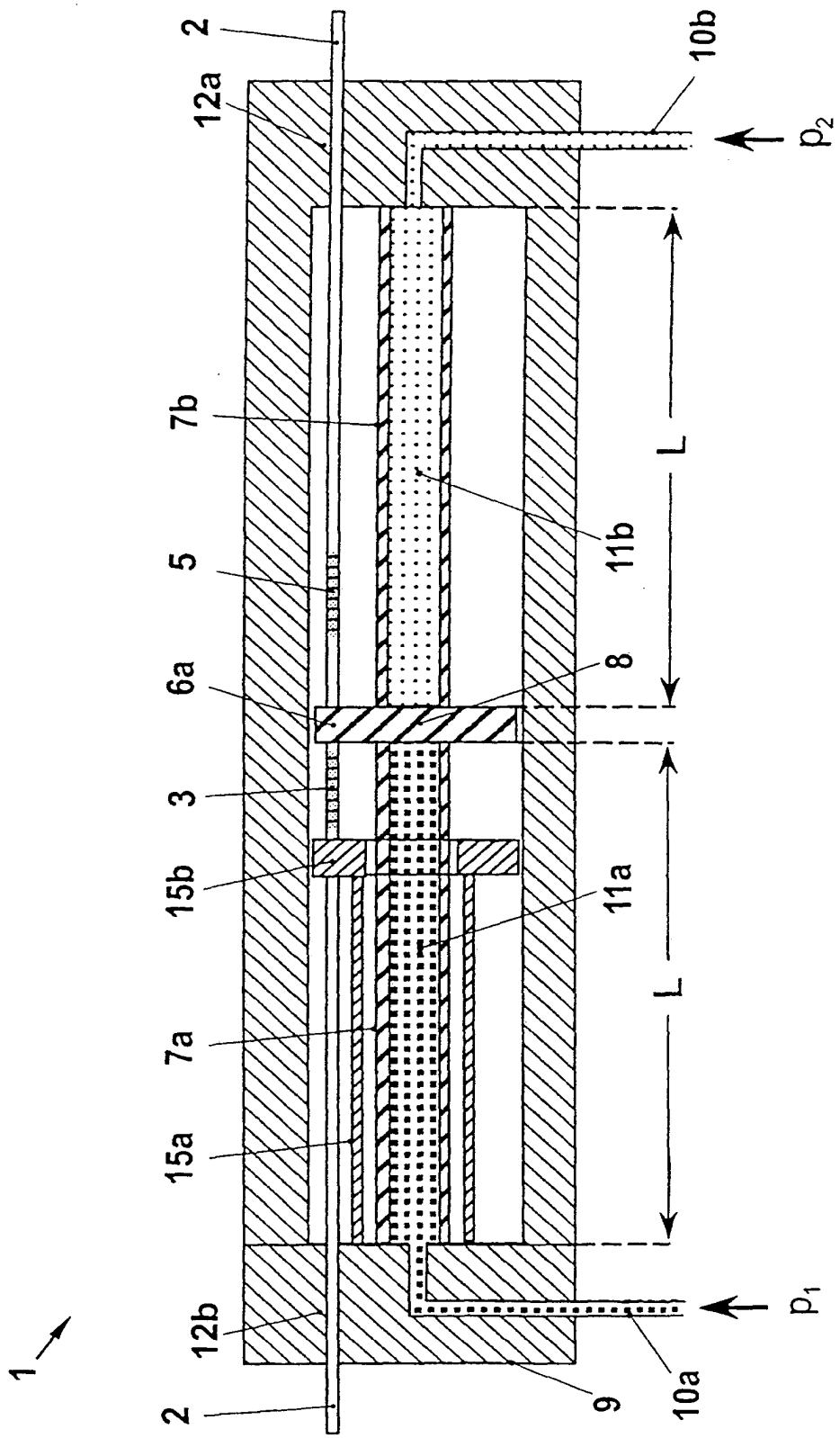


FIG. 2a

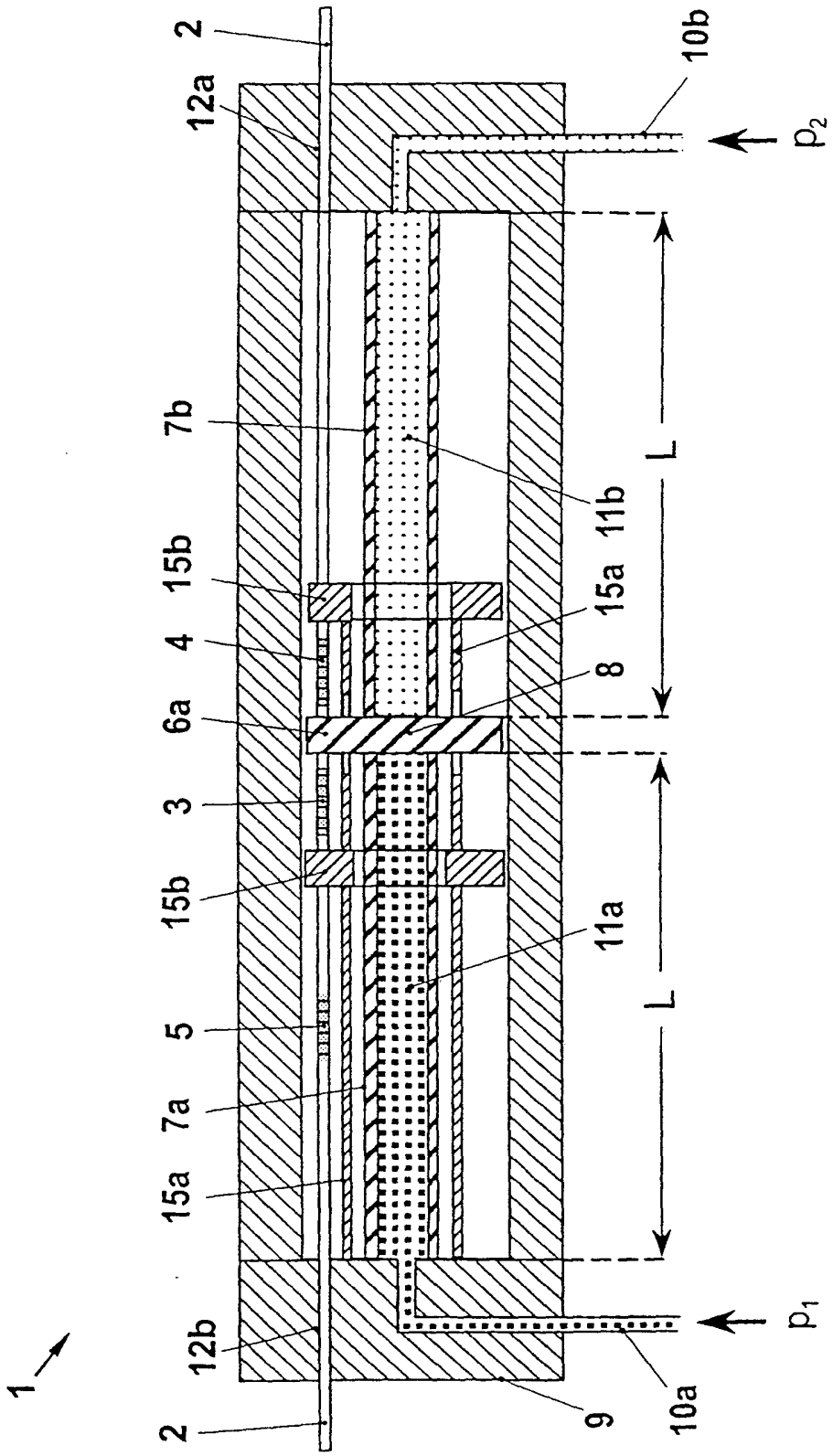

2
12a
10b
p_2
7b
11b
15b
15a
4
8
6a
3
15b
11a
5
7a
15a
12b
p_1
2
9
10a
1
L
L

FIG. 2b

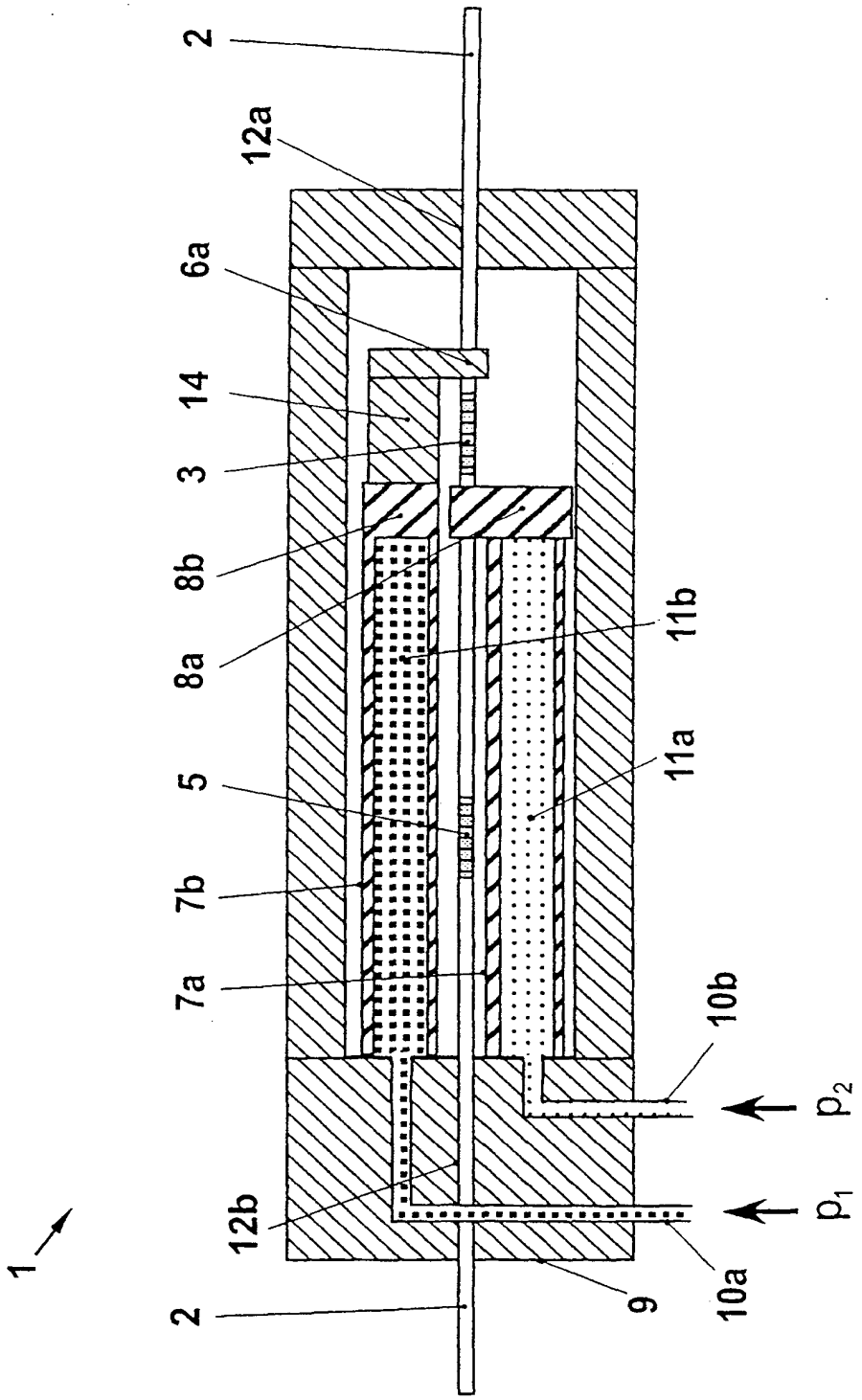


FIG. 3a

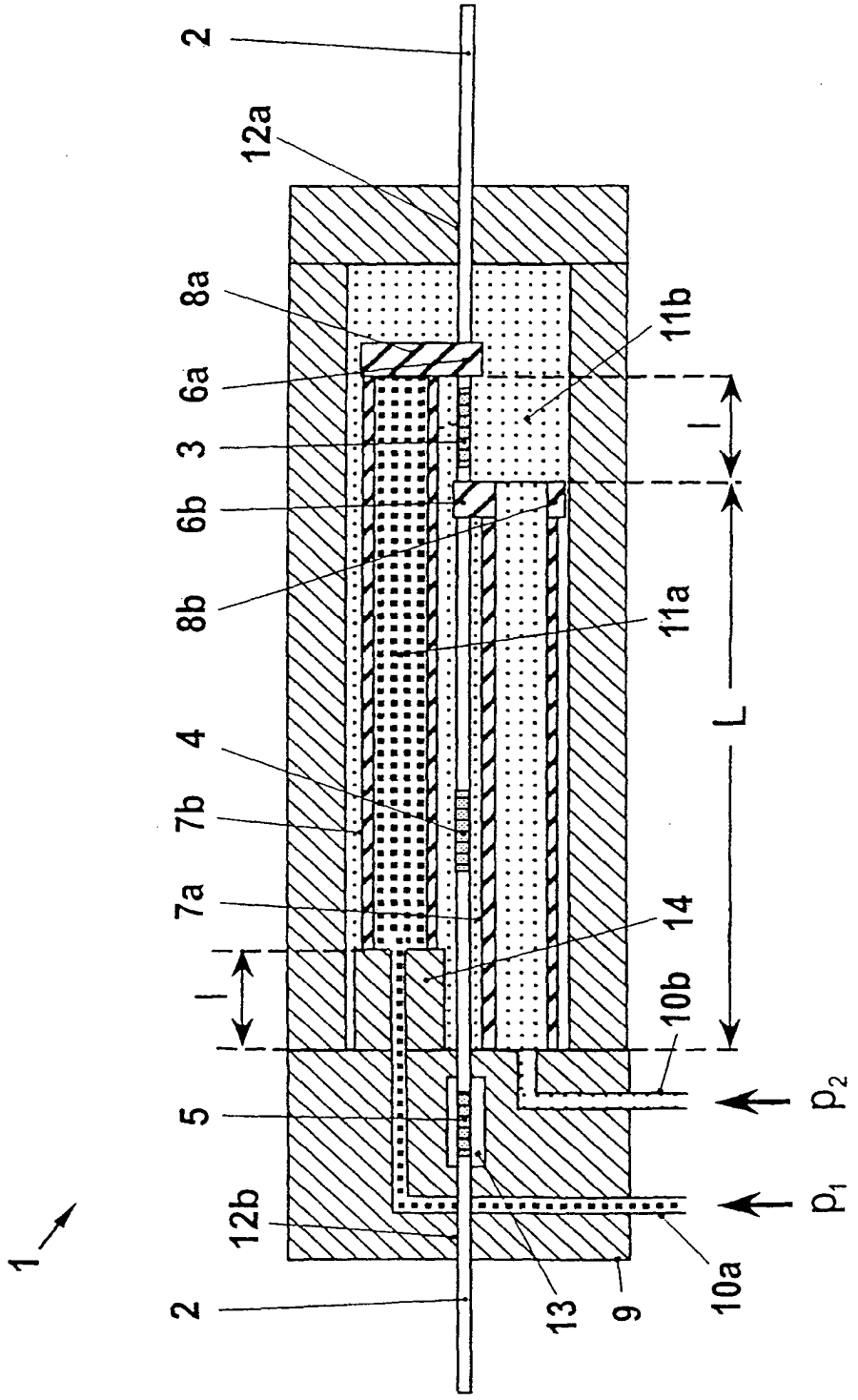


FIG. 3b

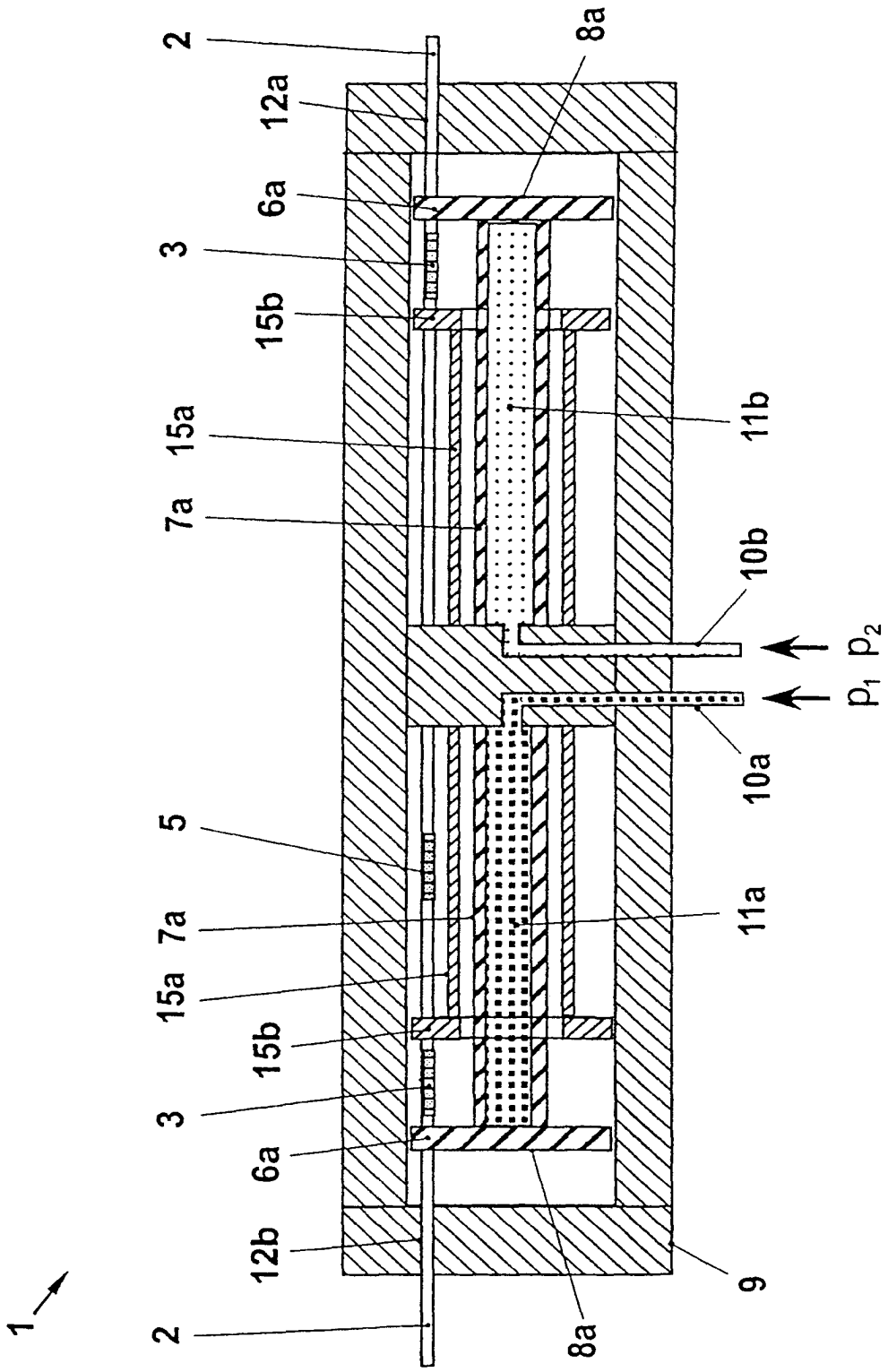

2
12a
6a
3
15b
15a
7a
5
7a
15a
15b
3
6a
12b
2
1
8a
11b
10b
p_1 p_2
10a
11a
9
8a

FIG. 4

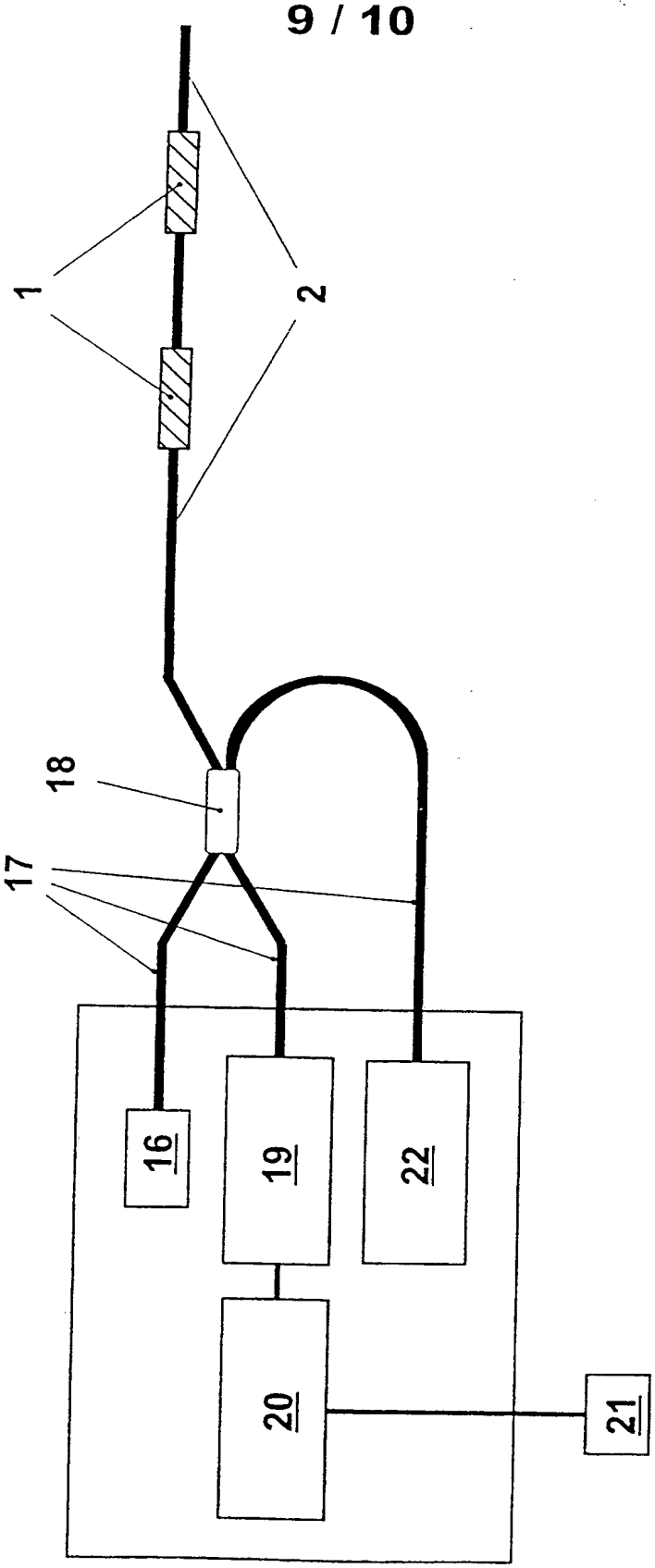


FIG. 5

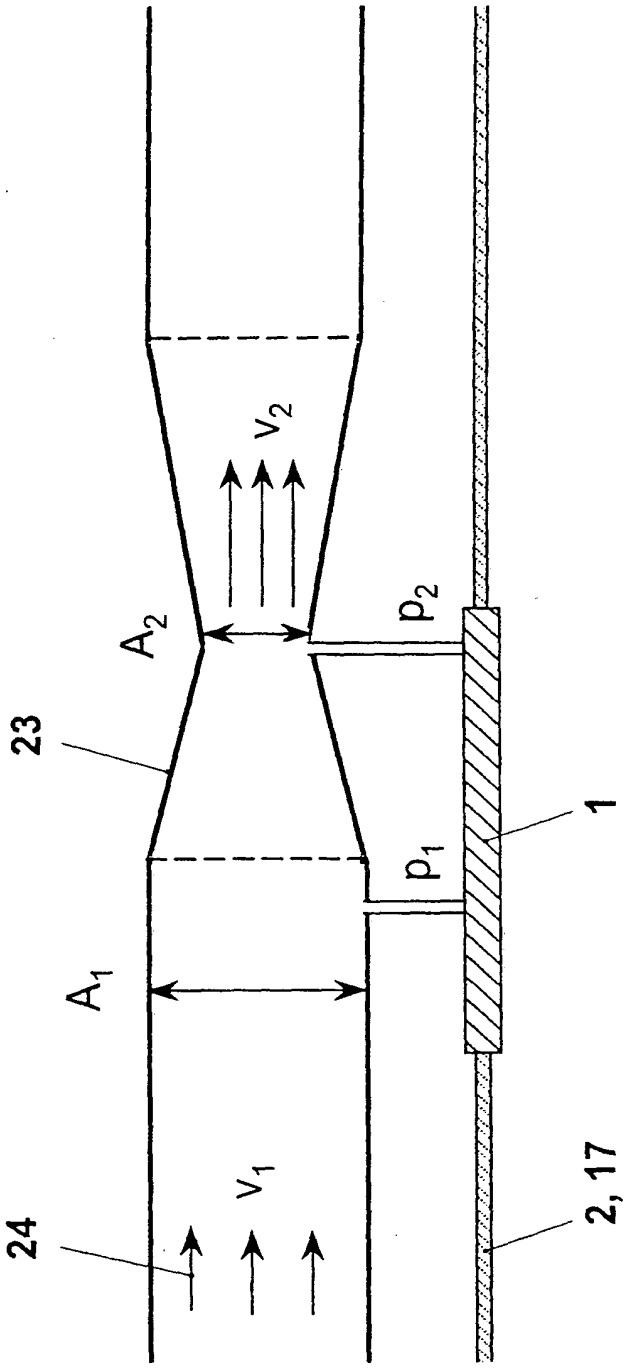


FIG. 6